



## Diseño de circuitos de control para válvulas proporcionales en sistemas hidráulicos

Ing. Rigoberto Alfonso Morales<sup>1</sup>

**Resumen.** Este artículo trata sobre los aspectos relacionados a la técnica de control electrónico de las válvulas proporcionales utilizadas en maquinaria con sistemas hidráulicos inventadas en los años 30. Las válvulas de control han permitido la solución de problemas de movimiento controlado de grandes cargas físicas tales como aviones, barcos, tractores y maquinaria de inyección de moldeo plástico en las que es necesario controlar la fuerza de grandes masas de hierro por medio de las presiones altas que se obtienen en los sistemas que utilizan el aceite hidráulico. Los primeros controladores electrónicos de estas válvulas utilizaban reóstatos a fin de regular el voltaje proporcional al movimiento requerido.

La tecnología electrónica, con sus innovaciones y componentes más eficientes, ha permitido también el control de estas válvulas. La utilización de transistores MOSFET (transistores de conmutación de grandes corrientes y operando con altas frecuencias) junto con la técnica PWM (Modulación de Ancho de Pulso), ha permitido el diseño de circuitos de control más eficientes, lo que se traduce en menor calor y menor espacio, así como reducir su peso.

En éste artículo se describe el diseño realizado con PWM para el control de válvulas proporcionales de 12 y 24 V, así como el diseño de un control por fase con SCR (Rectificador Controlado de Silicio) para una válvula proporcional de 10 V. Se estudian los efectos de variación de voltaje así como la variación de frecuencia en el comportamiento. Tanto la técnica de PWM con MOSFET y la técnica de control de fase con SCR permiten la variación del voltaje promedio y también el voltaje RMS que hacen ajustar la posición del vástago de la bobina a la posición deseada, y este vástago regulará la válvula para variar la presión o el flujo del aceite hidráulico.

**Palabras clave.** Servomecanismo, control hidráulico, modulación de impulsos (electrónico), ingeniería hidráulica, electrónica de potencia.

### Desarrollo

El control y transmisión de energía por medio de un fluido presurizado se ha desarrollado en las últimas décadas de tal forma que es posible lograr controles de alta potencia con gran exactitud y rapidez especialmente en áreas tales como la maquinaria industrial, control de naves aéreas y el manejo de grandes fuerzas como en la maquinaria hidráulica de terracería y construcción.

La combinación de los circuitos y componentes electrónicos con la rapidez y altos niveles de fuerza de los sistemas hidráulicos ha conducido a la solución de estas aplicaciones industriales de potencia hidráulica.

La ingeniería de potencia hidráulica tiene cuatro clases de válvulas de control eléctricas, las cuales son:

1. Ingeniero Electricista, Coordinador de la carrera de Técnico en Ingeniería Electrónica Industrial, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE Sede Santa Tecla. E-mail: rigoberto.morales@itca.edu.sv

**a) Válvulas de conmutación ON – OFF.** Son ampliamente utilizadas para permitir o no el flujo de aceite hidráulico.

**b) Válvulas electrohidráulicas proporcionales.** Utilizadas ampliamente en los sistemas de lazo abierto (sin un sensor de posición) son controladas electrónicamente para producir una presión de salida o la rapidez del flujo proporcional a la señal de entrada.

En la figura 1 se observa el cuerpo de una válvula de control de presión para los pistones de una máquina de fabricación de plástico.

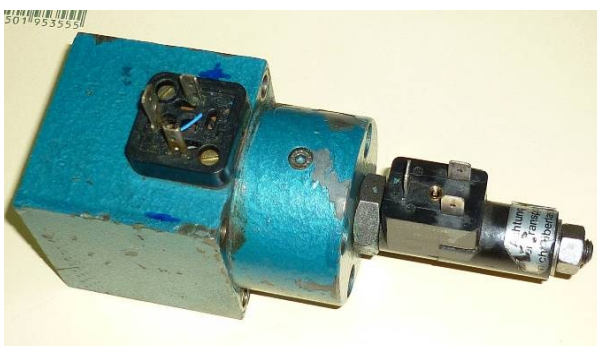


Figura 1. Válvula proporcional de máquina de inyección de plásticos de 24 VDC.

Éstas ofrecen las ventajas de inversión de sentido, variación continua de los parámetros controlados y permite reducir el número de dispositivos hidráulicos requeridos para tareas particulares de control.

**c) Servo válvulas electrohidráulicas.**

Generalmente se usan en sistemas de control de lazo cerrado. El concepto de servo es una expresión ampliamente utilizado. Indica que es un sistema en el cual una señal de entrada de baja potencia es amplificada para generar una señal o salida de alta potencia. Por ejemplo una señal de baja potencia de 0.08 Watts puede producir un control analógico de potencia alcanzando los 100 KW.

Los sistemas servo electrohidráulicos producen uno de los mejores tipos de

controladores desde el punto de vista de precisión y tiempo de respuesta. Se utilizan para controlar casi todos los parámetros hidráulicos y mecánicos tales como la presión, presión diferencial, velocidad angular, desplazamiento, desplazamiento angular, fuerza y otros parámetros.

**d) Válvulas digitales.** En este tipo de válvulas, un motor de pasos, controlado por los pulsos de un microprocesador, regula el posicionamiento de la válvula.

Control continuo de las válvulas proporcionales

Como se ha expresado anteriormente una válvula proporcional no tiene un sensor de posicionamiento, su desplazamiento es proporcional al voltaje aplicado. Ahora bien, esta válvula proporcional se denomina servo válvula cuando se agrega un sensor de desplazamiento y un circuito corrector compara el desplazamiento deseado con el desplazamiento actual y este sistema se denomina control de lazo cerrado. Generalmente el sensor de posicionamiento de la servo válvula es el LVDT.

Todas las bobinas usadas en las válvulas proporcionales son bobinas de corriente directa DC. Las bobinas de AC tienen una elevación de corriente inicial aproximadamente 5 veces mayor que su corriente en reposo.

Los solenoides DC no presentan estas elevaciones, así que la armadura puede permanecer parcialmente desplazada sin incrementar su corriente. Al desplazarse parcialmente la armadura, el spool o émbolo puede desplazarse también parcialmente, produciendo también una salida parcial de la válvula.

El método más simple utilizado para manejar o controlar una válvula proporcional sería utilizar un reóstato pero la disipación del reóstato producirá calor desperdiciando potencia y haciendo ineficiente el control.



Es necesario utilizar un método más eficiente. Existen diferentes técnicas para controlar la potencia entregada a una carga de tipo DC. Por ejemplo:

Control lineal o activo con un transistor de potencia de paso, es similar a una fuente lineal regulada.

Este tipo de control requiere un transistor de potencia que esta realizando la misma función de un reóstato y por lo tanto es ineficiente.

### **Control de potencia por PWM**

En esta técnica se aplica a la bobina DC el voltaje máximo de 24 V interrumpiendo la corriente a la bobina en pulsos de alta frecuencia. El ancho del pulso determinará el valor promedio de voltaje entregado a la bobina. Esta técnica es muy eficiente ya que el transistor disipa una potencia muy pequeña y no genera un calor significativo.

### **Control de Fase**

Este tipo de control es comúnmente realizado para el control de los motores DC. Utilizando SCR se hace conducir éste a un ángulo dado de disparo y este recorte de los semiciclos permite variar el voltaje promedio a la bobina de la válvula.

En este trabajo se presentan dos diseños de control de potencia de válvulas de 24 V DC utilizando estos dos últimos enfoques, es decir PWM y control de fase.

### **Construcción de una válvula proporcional.**

Una válvula proporcional consta de una válvula hidráulica direccional de pilotaje cuyo spool o émbolo es movido por una bobina y es el principio de los altavoces, en los que una bobina interactúa con un magneto para producir el movimiento o desplazamiento de la misma. Cuando la corriente circula por la bobina, se genera una fuerza electromotriz que produce el movimiento de la armadura, la cual mueve el émbolo de una válvula de liberación de presión.

Este principio es conocido como Voice Coil y se utiliza ampliamente en los discos duros para mover o posicionar los cabezales lectores del disco.

Varios factores tienen una influencia en el error de la corriente a la bobina y la posición del émbolo de la válvula. Por ejemplo la histéresis del resorte y la fricción del émbolo de la válvula, así como pérdidas en la bobina misma, son los factores causantes del error. A fin de eliminar estos efectos de fricción e inercia, a menudo se agrega una señal senoidal de baja amplitud y baja frecuencia en la señal de control de corriente de la bobina. Esta señal extra es denominada dither o vibración, y su efecto es mantener el émbolo de la válvula en constante movimiento en un esfuerzo por responder a la inercia y la fricción. Idealmente esta oscilación causada por la vibración no altera la salida de la válvula.

### **DISEÑO DE UN CONTROL DE POTENCIA POR PWM**

El control de potencia a cargas DC como la velocidad de los motores DC o solenoides de válvulas puede realizarse variando el voltaje de la fuente de suministro de potencia aplicado a la armadura. Se puede variar el voltaje promedio conectando y desconectando rápidamente la fuente aplicada a una carga de manera que podemos variar la velocidad del motor. Esta conexión y desconexión por medio de pulsos de alta frecuencia, es la llamada modulación de ancho de pulsos o PWM.

Con esta modulación alteramos únicamente el ancho de los pulsos sin cambiar la frecuencia y alteramos así, el voltaje promedio a la armadura. El dispositivo de conexión y desconexión puede ser un transistor bipolar o un MOSFET de potencia el cual presentará únicamente los estados de corte y saturación, lo que hace que el transistor no disipe una potencia apreciable.

Así, el control de velocidad es altamente eficiente ya que la potencia es entregada enteramente al motor y el control no produce calor o potencia disipada.

El transistor más adecuado para utilizar en esta técnica es el transistor MOSFET por las ventajas de manejar altas corrientes, y de manejo simple en su compuerta.

Existen diversos tipos de transistores MOSFET pero en electrónica de potencia se utilizan los MOSFET llamados de enriquecimiento y de canal N para conmutar rápidamente cargas hasta de 100A.

Estos transistores, a diferencia de los transistores bipolares, son controlados por voltaje y no por corriente. Esto los hace útiles en los convertidores de voltaje de DC a AC, ya que son más eficientes que el transistor bipolar porque no se gasta energía (corriente de base) en el circuito de control. Esto permite a su vez, una mayor facilidad en el diseño de los circuitos de control. Incluso la salida misma de los operacionales puede utilizarse para manejar la compuerta de estos transistores. Quizás, el pequeño inconveniente de estos dispositivos es que son sensibles a la electricidad estática que los destruye fácilmente. Pero una alta resistencia de 100K entre compuerta y source disminuye este riesgo y no afecta la operación del dispositivo.

### ¿Cómo se logra variar el ancho del pulso para modular la potencia?

El ancho del pulso en la compuerta del MOSFET se obtiene utilizando un comparador con amplificador operacional, éste compara un voltaje de referencia constante con una señal de diente de sierra. La figura 2 muestra un comparador de precisión realizando la comparación de una señal de diente de sierra con un voltaje de referencia variable.

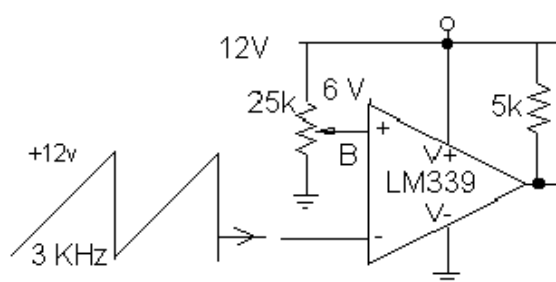


Figura 2. Comparación de una onda de diente de sierra con un voltaje de referencia.

El pulso en la salida producto de la comparación, es el pulso mostrado en la figura 3.

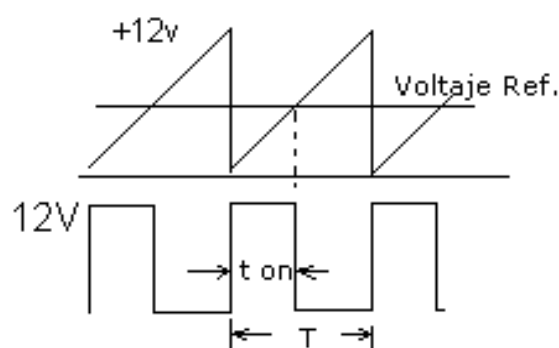


Figura 3. El resultado de la comparación es un pulso de ancho variable dependiente del voltaje de referencia.

Como se observa, al aumentar el voltaje de referencia aumentará el ancho del pulso y al aumentar el ancho del pulso se aumentará el voltaje promedio entregado a la bobina de la válvula. En la Fig. 4 un MOSFET es utilizado para controlar la potencia de una lámpara de 12 V, su brillo aumentará si se aumenta el ancho de pulso de encendido.

Estos transistores pueden manejar grandes corrientes lo que posibilita manejar las corrientes típicas de 1.5 o 2 amperios de las bobinas de las válvulas.

Se muestra en la figura 4 la conexión del transistor MOSFET cuya excitación de compuerta proviene del comparador.



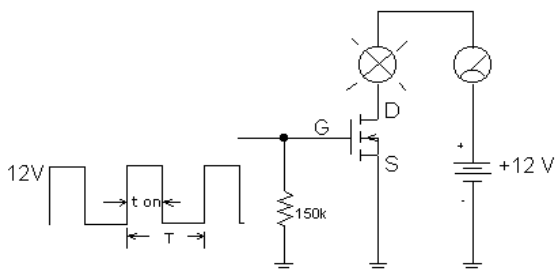


Figura 4. Modulando el ancho del pulso de encendido se modula la potencia y el brillo de la lámpara.

El diseño del circuito completo de control de la válvula se muestra en la figura 5. En este diseño es posible variar el ancho del pulso, así como variar la frecuencia portadora o triangular. Si esta frecuencia de la onda portadora es baja se logra el efecto de dither o vibración.

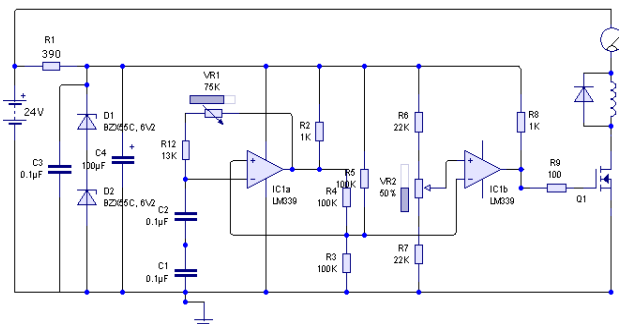


Figura 5. Circuito controlador de potencia PWM utilizando un único circuito integrado comparador; el primer comparador es el oscilador de onda triangular y el segundo comparador compara el valor deseado de corriente con la onda portadora.

### DISEÑO DEL CONTROLADOR POR FASE

Utilizando un SCR en media onda es posible controlar el voltaje promedio entregado a la bobina solenoide de la válvula, variando el ángulo de disparo por medio de dos redes de retardo de disparo a la compuerta del SCR. Las resistencias son de bajo valor a fin de mantener un voltaje inicial pequeño para que la bobina se encuentre ligeramente energizada y no aplicar un voltaje desde cero voltios.

Este circuito presenta dos grandes ventajas para el control de las válvulas, ya que el voltaje es de media onda, este presenta un gran rizado natural que sirve como la señal de dither y que ya no es necesario agregar a la onda de voltaje de regulación.

Otra ventaja que presenta este circuito es que como tiene capacitores en el circuito de compuerta, estos capacitores realizan la función de rampa de aceleración como de desaceleración en los cambios de voltaje de control.

Este circuito se probó exitosamente con una válvula proporcional de 10 V. El circuito para una válvula de 24 debe ser alimentado por un transformador de 50 V a fin de lograr un voltaje promedio de 24 V.

Se puede observar en el circuito de la figura 6 la doble red de retraso y los cambios de posición de la válvula se hacen cambiando la resistencia ajustable VR1.

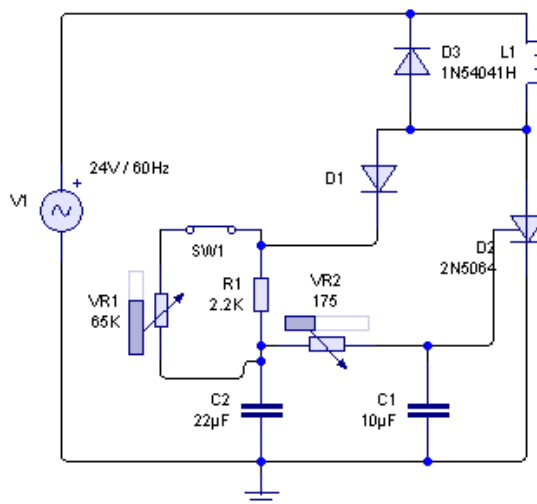


Figura 6. Circuito con SCR para el control de la válvula por variación del ángulo de disparo. Adelantando el ángulo se logra mayor potencia a la bobina.

## CONCLUSIÓN

Las válvulas proporcionales permiten el control de presión o flujo en los sistemas hidráulicos (sin la precisión, complejidad y costo de las servo válvulas) logrando movimientos de control de fuerza o la velocidad de cilindros hidráulicos de gran potencia mecánica en la maquinaria industrial.

La disponibilidad de los componentes electrónicos y las diversas técnicas de control ofrecen una amplia selección en el diseño de los circuitos de control de estas válvulas. Estos circuitos de control, pueden ser gobernados desde interruptores manuales o por controladores automáticos programados.

## GLOSARIO

**Amplificador de servo válvula:** Es el dispositivo electrónico que amplifica una señal eléctrica de comando para proporcionar potencia a fin de activar la bobina de una servo válvula o de una válvula proporcional.

**Control por fase:** Técnica de regulación de potencia eléctrica entregada a una carga, por variación del ángulo de disparo a un SCR o TRIAC.

**Dither:** Una señal eléctrica periódica de baja amplitud con una frecuencia relativamente alta súper impuesta a la señal de entrada de la servo válvula para mejorar la resolución del sistema.

**LVDT:** Transformador lineal variable y diferencial: es un sensor de alta resolución que se usa para medir desplazamiento

longitudinal, se usa comúnmente como el sensor de una servo válvula y que puede ir montado en el mismo encapsulado de la servo válvula o en un montaje externo.

**MOSFET:** Transistor de Efecto de Campo de Semiconductor y Metal-Oxido. Este tipo de transistor es ampliamente utilizado para la conmutación de corrientes altas a frecuencias superiores a las del transistor.

**PWM (Pulse Width Modulation):** Es una técnica de control de potencia eléctrica entregada a una carga por variación del ancho del pulso del voltaje aplicado, siendo la amplitud del voltaje aplicado constante o fijo.

**SCR:** Rectificador Controlado de Silicio.

**Servomecanismo:** Un sistema de control que mantiene automáticamente la posición de un objeto en una posición deseada.

**Servo válvula:** Dispositivo utilizado para producir un control hidráulico en un servomecanismo.

**Servo válvula electrohidráulica:** Servo válvula que produce un control hidráulico en respuesta a una entrada de señal eléctrica.

**Válvula proporcional:** Es una válvula de control del flujo hidráulico proporcional a una señal eléctrica. Una válvula proporcional no esta asociada a un sensor de posicionamiento y por esta razón no se considera una servo válvula.

**Voice coil:** Principio de electromagnetismo en el cual una bobina cubre a un imán estacionario. Al aplicar corriente a la bobina esta se desplaza proporcionalmente a la magnitud corriente.

## Bibliografía consultada

1. DE ROSE, Don. Proportional and servo valve technology. Fluid power journal [en línea]. March /April 2003, no.12. [fecha de consulta: 15 Junio 2012]. Disponible en: <http://www.moog.com/literature/ICD/ProportionalServoValveTechnology-fp/article.pdf>
2. MALONEY, Timothy J. Electrónica industrial moderna. 5a. ed. Naucalpan de Juárez, México: Pearson Educación, 2006. 972 p. ISBN: 970-26-0669-1
3. POLEY, Richard. DSP control of electro-hydraulic-servo actuators. Texas instruments [en línea]. January 2005. [fecha de consulta: 15 Junio 2012]. Disponible en: [http://www.ti.com/lit/an/spra76/spra76.pdf?DCMP=OTC-DSP\\_March2005&HQS=EtechnInnovations%2BNL%2Betechmar05appnhydservai](http://www.ti.com/lit/an/spra76/spra76.pdf?DCMP=OTC-DSP_March2005&HQS=EtechnInnovations%2BNL%2Betechmar05appnhydservai)
4. RABIE, M. Galal. Fluid power engineering. México, D.F. : McGraw-Hill, 2009. 448 p. ISBN: 9780071622462